考虑温度影响的机械弹性电动轮磨耗仿真分析

林 菜[1*] 侯翔越[1] 赵又群[1] 刘轩江[1] 臧利国[2]
1.南京航空航天大学能源与动力学院,南京,210016
2.南京工程学院交通工程学院,南京,211167

摘要:针对机械弹性电动轮开展了考虑温度的多工况磨耗仿真分析。通过摩擦磨耗试验拟合的胎面材料摩擦模型参数验证了磨耗仿真方法的有效性,通过负荷特性试验验证了车轮有限元模型力学特性的准确性。开展多工况磨耗仿真,分析了铰链数量、车速及行驶方向对磨耗深度与接地压力的影响,并对是否考虑温度的典型工况进行了对比。研究结果表明,磨耗深度分布与接地压力分布趋势一致,且温度对磨耗深度预测影响明显。

关键词:机械弹性电动轮;磨耗;温度;有限元;接地压力分布
中图分类号:U467.4
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.11.006 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Simulation Analysis of Wear in Mechanical Elastic Electric Wheels Considering Temperature Influence

LIN Fen[1*] HOU Xiangyue[1] ZHAO Youqun[1] LIU Xuanjiang[1] ZANG Liguo[2]
1.College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016
2.School of Traffic Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, 211167

Abstract: A multi-condition wear simulation analysis was conducted for the mechanical elastic electric wheel with consideration of temperature effects. The wear simulation method was validated by calibrating the parameters of the tread material friction model through friction and wear tests, and the accuracy of the wheel finite element model was validated against load characteristic tests in terms of mechanical characteristics. Multi-condition wear simulations were performed to analyze the effects of the numberof hinge, vehicle speed, and driving direction on wear depth and contact pressure, and a comparison was made between typical operating conditions with and without the temperature effects. The results indicate that the distribution of wear-depth is consistent with that of contact-pressure distribation, and temperature has a significant influence on the prediction of wear depth.

Key words: mechanical elastic electric wheel; wear; temperature; finite element; contact pressure distribution

0 引言

轮胎的行驶磨耗不仅缩短轮胎使用寿命,还直接影响车辆的行驶表现[1-2]。轮胎磨耗受橡胶材质、轮胎结构、行驶工况等多种因素影响[3]。传统试验方法难以实现单一变量的控制且试验成本偏高[4],因此数值模拟与有限元分析成为轮胎磨耗的当前主流研究方式。CHO等[5]构建了幂函数型磨损率模型,确定了摩擦能量率与胎面磨损速率的关系,依托数值分析方法预测了磨损量与磨损深度。张竞楠[6]结合滞后生热机理、滚动阻力模型预测了胎面磨耗,推导了与胎压、车速等相关的磨耗量预测模型。WANG等[7]结合改进环模型与刷子模型建立了轮胎磨损预测模型,发现了载荷、滚动速度、胎压等参数及接触特征对磨耗的作用规律。NGUYEN等[8]引入方向性损伤变量建立磨损模型,阐明了滑动方向对轮胎磨损的非单调影响规律。

相较于纯数值模拟,有限元仿真具备缩短研发周期、降低研发成本、提高设计效率等优势[9]。LY等[10]基于修正Archard磨损理论与结合胎面硬度的温度特性,建立了热力耦合磨损模型,证实温度对轮胎磨损行为存在显著影响。周海超等[11]优化了橡胶磨损模型,发现了温度、磨损、接地压力的耦合作用。文献[12-16]分别从胎面形貌更新、跨尺度热力耦合、网格算法优化、摩擦能量密度分析等角度完善仿真技术,进一步提高了轮胎磨耗仿真的精度与实用性。现阶段,针对传统充

收稿日期:2025-07-15
基金项目:国家自然科学基金(52272397,52472411,52372357)

气轮胎的有限元磨耗分析、温度效应模拟等相关技术已发展成熟。

机械弹性电动轮(mechanical elastic electric wheel,MEEW)作为非充气轮胎,可规避漏气、爆胎风险,可靠性与使用寿命更具优势[17],但其特殊结构导致磨耗特性与传统轮胎存在区别。现有的轮胎磨耗研究大多围绕充气轮胎展开,针对MEEW且考虑温度影响的磨耗研究较少,因此开展相关仿真研究对揭示MEEW的磨耗机理具有重要意义。本文先通过胎面橡胶摩擦磨耗试验拟合修正后的摩擦模型,然后结合负荷特性试验验证有限元模型的力学表征能力。设置多组工况研究铰链数量、车速、行驶方向对磨耗结果和接地压力的影响,通过考虑与忽略温度因素的仿真结果差异揭示温度、结构、工况参数对MEEW磨耗的作用机制。

1 MEEW的结构及承载特性

1.1 MEEW的结构

如图1所示,MEEW由橡胶层、卡环、弹性环、轮毂外盘、轮毂内盘、铰链组、轮毂电机和輮轮组成,其中,铰链由周向均布的多节链条组成,弹性环由卡环限位并固定在輮轮内,橡胶层包括胎面橡胶和胎体橡胶[18]。



图1 MEEW结构

Fig.1 Structure of MEEW

1.2 MEEW的承载特性

如图2所示,车轴传递垂向载荷至车轮时,非接地部分的铰链受拉力作用呈张紧状态,引发弹性环形变,而接地段的铰链保持自由弯曲形态,提高了减振性能与附着能力[19]。图2中,W为车轮垂向力,数字1~12表示沿圆周方向依次编号的12组铰链。

MEEW依靠铰链结构承载,铰链数量直接影响MEEW的接地状态和力学特性。本文在MEEW周向均布6组、12组、18组铰链,探究铰链数量对MEEW磨耗性能的影响规律。

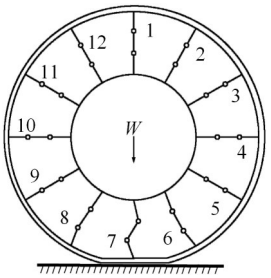


图2 MEEW垂向承载方式

Fig.2 Vertical load-bearing method of MEEW

2 橡胶的摩擦磨耗试验

橡胶的摩擦磨耗特性与温度密切相关。温度通过增大摩擦因数,间接增大界面间的能量耗散与材料撕裂程度,导致磨耗率显著增大。因此开展MEEW的磨耗仿真研究必须考虑胎面接地区域温度[20]。橡胶的摩擦磨耗试验需要设计与温度相关的试验。

2.1 试验样品及设备

试验材料为MEEW的胎面橡胶。试验件为固定于试棒一端的橡胶圆盘(直径14 mm、厚度2.5 mm)试样(上试样),对偶材料为砂纸(下试样),其中,40~80目砂纸模拟粗糙沥青路面,100~180目砂纸模拟普通水泥路面或较光滑沥青路面,180目以上砂纸模拟近抛光表面。试验设备为MFT-5000多功能摩擦磨耗试验机[21]。

2.2 橡胶的摩擦试验

MEEW滚动过程中,接地区域与地面之间的摩擦因数受温度、路面粗糙度、接地压力等因素影响,为准确表达运动中摩擦因数的变化,引入修正Savkoor摩擦模型[22]:

$$\mu_{\mathrm{d}}=\mu_0+(\mu_{\mathrm{m}}-\mu_0)\exp(-(c_{\mu v_{\mathrm{s}}}\lg v_{\mathrm{s}}-d_{\mu T}(T_t-T_0))^2) \quad (1)$$

式中:μ_{d}为动摩擦因数;μ_{m}、μ_0分别为峰值动摩擦因数和基准动摩擦因数;$c_{\mu v_{\mathrm{s}}}$为与滑移速度相关的系数;v_{s}为滑移速度;$d_{\mu T}$为与温度相关的系数;T_{t}为胎面温度;T_0为参考温度。

为拟合MEEW胎面橡胶的摩擦模型,设计并开展摩擦试验。表1所示为试验工况参数,其中,编号1对应对照组,编号2~8对应试验组。

试验采用瞬态测定方法[21]即先加载、后加速的方式,以提高结果的准确性。为保证数据有效,每组试验结束后更换上下试样,以每个试验条件下5次试验结果的均值为该条件的试验结果,如图3所示。

如图3a所示,随着滑移速度的增大,摩擦因数先增大再缓慢减小,过渡阶段(载荷150、300 kPa)的摩擦因数变化较大,载荷450 kPa的摩擦因数变化较小。如图3b所示,25 ℃、60 ℃的摩

表 1　摩擦试验设计

Tab.1　Friction test design

编号	负载/N	粒度/目	温度/℃	滑移速度/(m·s^{-1})
1	30	180	25	0.3,0.8,1.0,2.0
2	60	180	25	
3	90	180	25	
4	30	240	25	
5	30	80	25	
6	30	180	60	
7	30	180	100	
8	30	180	120	

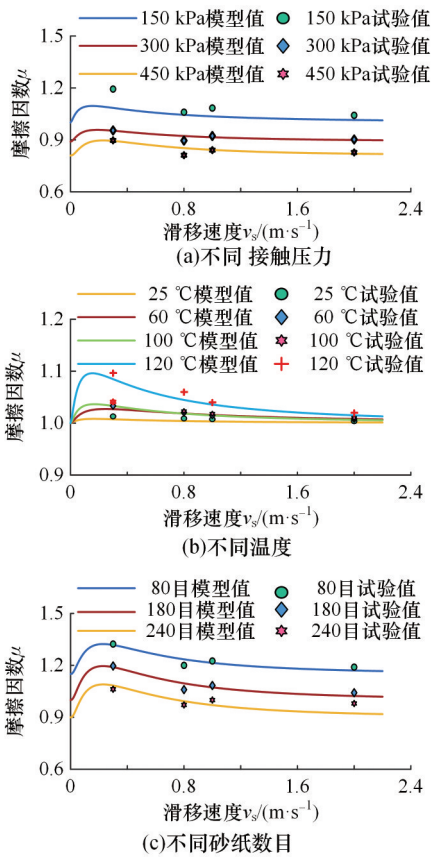


图 3　MEEW 胎面橡胶摩擦因数的试验值与模型值

Fig.3　Test values and model values of the friction coefficient of MEEW tread rubber

擦因数随温度升高而明显增大。如图 3c 所示，随着砂纸目数的减小(路面粗糙度的增大)，摩擦因数逐渐增大；滑移速度增大时，光滑(目数大)路面摩擦因数的波动大于粗糙(目数小)路面。由图 3 可看出，修正 Savkoor 摩擦模型对试验数据的拟合效果较好，能很好地表征 MEEW 橡胶材料的摩擦特性。

2.3　橡胶的磨耗试验

MEEW 较重，对设备要求高且试验周期长，因此使用胎面橡胶材料进行磨耗试验，通过对比小样件的试验结果与仿真结果来验证所选磨耗仿真方法的准确性[21]。

表 2 所示为设定的试验工况参数，编号 1 对应对照组，编号 2～5 对应试验组。试验中，下试样为 180 目砂纸，滑移速度为 0.3 m/s，试验时间为 10 s。为保证数据有效，每组试验结束后更换为全新试样，将每个试验参数下的 5 次试验结果均值作为该参数的试验结果，如图 4 所示。垂向负载对橡胶磨耗质量影响非常明显：随着负载每增加 30 N，磨耗质量约增加 20 mg；环境温度对磨耗质量的影响较小，温度每升高 10 ℃，磨耗质量仅增加约 0.5 mg，垂向负载是主导橡胶磨耗行为的核心因素。载荷和温度的升高都会使磨耗质量增大，但磨耗质量受载荷变化的影响更大。

表 2　磨耗试验设计

Tab.2　Wear test design

编号	1	2	3	4	5
负载/N	60	90	30	60	60
温度/℃	25	25	25	80	120

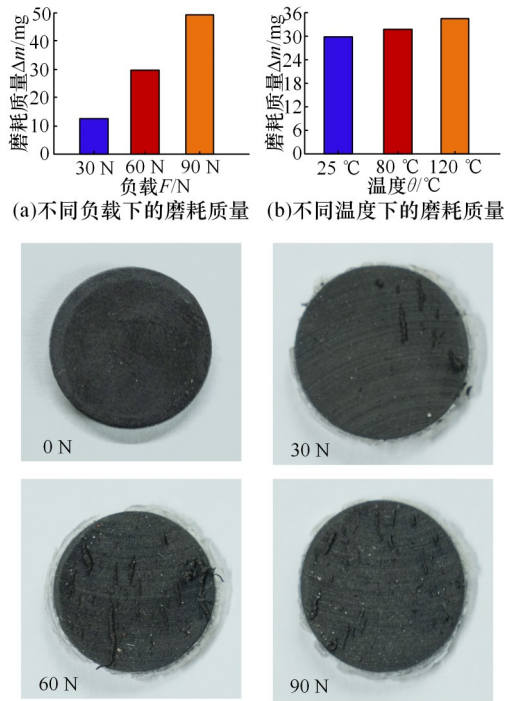


图 4　橡胶磨耗试验结果

Fig.4　Wear test results of tread rubber

由图 4c 可以看出，试样表面出现与磨耗运动方向一致、走向清晰可辨的纹理，且随着载荷的增大，纹理逐渐从稀疏变为密集且增多。

3　MEEW 有限元模型的建立及验证

3.1　MEEW 有限元模型的简化

利用有限元软件建立 MEEW 的三维非线性有限元模型。MEEW 结构比较复杂，为提高计算效率，在保证精度的前提下对车轮作如下简化：

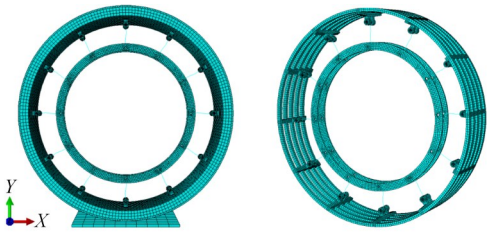
1)胎面与胎体采用绑定约束连接;弹性环与卡环在几何上进行一体化简化,并预置于轱轮内部。

2)忽略所有的连接件实体,并用耦合关系代替;采用B31梁单元模拟铰链。

3)将轮毂简化为具有相应环孔的圆盘结构;忽略电机结构的影响,只考虑电机质量(添加到轮毂上)。

4)将MEEW的胎面简化为光面胎。

如图5所示,12组铰链MEEW有限元模型的整体最大外径1044 mm,轴向总宽度340 mm,内部支撑环直径686 mm。采用铰接约束(Hinge)模拟铰链之间、铰链与轮毂、铰链与卡环的连接关系。弹性环与卡环采用嵌入约束(Embedded)嵌入胎体。胎面采用八节点三维温度-位移耦合的六面体单元C3D8T,胎面模型全局近似尺寸为3 mm。对接触磨耗区域进行局部网格加密,尺寸设为0.5 mm。胎面和胎体通过绑定约束(Tie)连接。



(a)MEEW与地面　(b)MEEW骨架

图5　12组铰链的MEEW有限元模型

Fig.5　Finite element model of MEEW with 12 sets of hinges

车轮与路面接触时,路面变形远小于轮胎变形,因此将地面设为刚体。胎面与路面之间的接触设为面面接触,采用硬接触描述接触的法向行为,采用罚函数描述接触的切向行为。

3.2　材料属性

MEEW主要材料是合金钢和橡胶。本文采用Mooney-Rivlin模型表达橡胶材料特性,相关系数由单轴拉伸试验测定。MEEW材料的部分参数如表3所示,合金钢的弹性模量为210 GPa,泊松比为0.29[23]。

表3　MEEW材料属性

Tab.3　Material properties of MEEW

材料	密度/(kg·m^{-3})	Mooney-Rivlin模型系数	
		C10	C01
胎面橡胶	1139	0.98	-0.51
胎体橡胶	920	0.85	-0.20
合金钢	7850		

3.3　MEEW负荷特性的仿真及验证

3.3.1　MEEW负荷特性仿真的设置

在轮毂中心设置参考点,建立参考点与轮毂内表面的耦合约束,将车轮受到的垂向载荷施加在参考点上。MEEW有限元模型的垂向载荷分别设为3 kN、6 kN、9 kN、12 kN、15 kN。

3.3.2　MEEW的力学特性试验

MEEW轮胎的力学特性试验在轮胎力学特性试验平台上完成[24]。通过力传感器动态获取载荷大小,利用光栅尺监测胎体下沉量及横向偏移量。接地印记由铺设模拟地台表面的压敏纸采集。

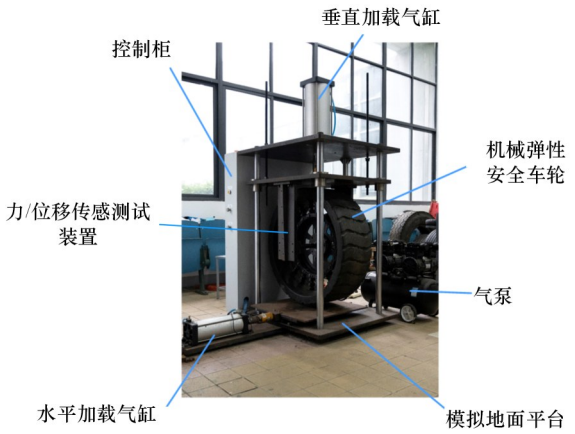


图6　轮胎力学特性试验台

Fig.6　Tire mechanical property test bench

试验具体操作流程如下:

1)将MEEW固定在轮胎力学特性试验台,将压感纸放在模拟地面平台。

2)启动试验台并设置与有限元仿真相同的垂向载荷。

3)每组试验完成后,更换新的压敏纸,读取并记录试验数据。

3.3.3　负荷特性的仿真结果与试验结果

如图7所示,仿真结果与试验结果之间误差较小,两者的最大误差为11.7%,且车轮下沉量与垂向载荷大小成线性关系。

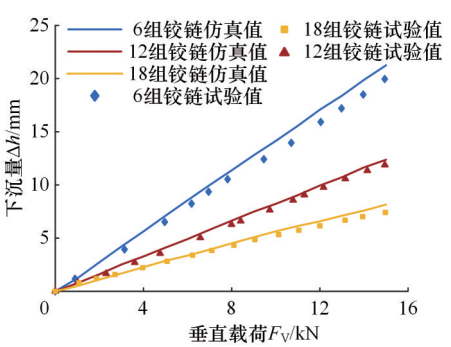


图7　MEEW下沉量的仿真结果与试验结果

Fig.7　Simulation results and experimental results of MEEW subsidence amount

如表4所示，铰链的增加导致接地印迹长度减小、宽度增加。由于简化了MEEW的部分结构，且对部分材料没有进行细分，所以仿真值和试验值之间存在较小的误差。

表4　MEEW接地印迹数据

Tab.4　MEEW contact patch data

接地印迹		铰链数量/组		
		6	12	18
长度	仿真值/mm	145	142	139
	试验值/mm	148	145	137
	误差/%	2.0	2.1	1.5
宽度	仿真值/mm	256	259	263
	试验值/mm	259	260	265
	误差/%	1.2	0.4	0.8

3.4　胎面橡胶的磨耗仿真及验证

选取MEEW胎面橡胶试样进行仿真分析，并结合试验结果来验证仿真的有效性。计算磨耗时，Archard模型是模拟磨耗过程的常用模型，其基本形式为[12]

$$w=KF_{\mathrm{N}}L/(HS) \tag{2}$$

式中：w为磨耗深度；K为材料磨耗系数；F_{N}为两段面的法向载荷；L为接触面相对滑移量；H为材料硬度；S为接触面面积。

Abaqus的自适应网格(ALE)技术可在计算过程中对胎面表层网格进行平滑重构与自适应调整，有效抑制了材料移除引发的网格畸变。UMESHMOTION子程序根据Archard模型实时计算磨耗深度，并在每个增量步后直接控制胎面表层网格节点的移动，动态再现轮胎表面的磨耗形貌演化。因此，本文使用ALE技术与用户子程序UMESHMOTION模拟轮胎表面的渐进式材料流失，以有效模拟特定工况下，由接触压力、滑动速度和温度共同作用的轮胎磨耗过程。

参照试验样品及设备规格，在有限元软件中建立几何模型与摩擦接触面：上试样为直径14 mm、厚度2.5 mm的圆盘结构，摩擦面采用平面结构，通过设置摩擦因数分别模拟40～80目、100～180目及180目以上三类砂纸。为提高计算效率，摩擦面设置为刚体。将表3所示胎面橡胶材料属性赋予上试样后，计算分为两个分析步：第一步施加垂向载荷，使试样与摩擦面建立稳定接触；第二步在保持垂向载荷的基础上施加切向位移，模拟试样与对偶面的相对滑动。为还原试验环境，在预定义场中设置对应的环境温度。磨耗深度的仿真结果如图8所示。如表5所示，仿真结果与橡胶磨耗试验实测数据较为吻合，最大误差为2.5%，证明本文选择的磨耗仿真方法对MEEW的胎面磨耗仿真是有效的。

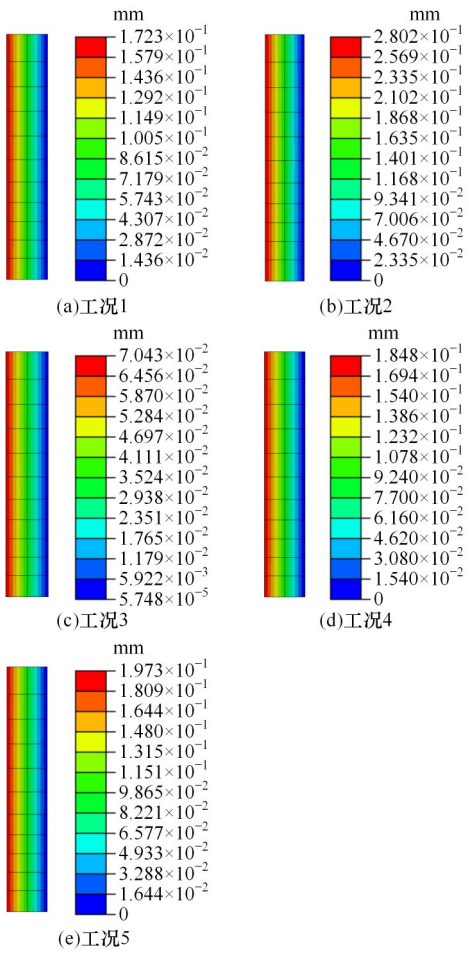


图8　不同工况的磨耗深度仿真结果

Fig.8　Simulation results of wear depth

表5　磨耗量的仿真值与试验值

Tab.5　Simulation and experimental results of wear amount

编号	试验值/mg	仿真值/mg	误差/%
1	29.6	30.2	2.0
2	49.3	49.1	0.4
3	12.6	12.4	2.5
4	31.6	32.4	2.6
5	34.3	34.5	0.6

4　MEEW磨耗的有限元仿真设计

4.1　技术路线

如图9所示，MEEW的磨耗仿真主要包括五个步骤：获取材料参数、获取温度场、建立MEEW有限元模型、接地仿真、磨耗仿真。MEEW温度场已获取[25]，获取材料参数、建立MEEW有限元模型、负荷特性仿真等不止已在前文介绍，本节仅介绍磨耗仿真。每个增量步中，通过磨耗计算逻辑求解磨耗速率与方向，并借助ALE技术持续更新磨耗区域网格，直至得到最终结果。

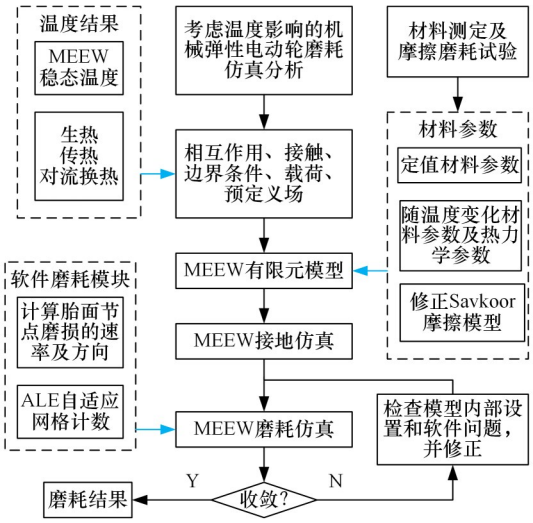


图9 MEEW磨耗仿真技术路线

Fig.9 Technical route of MEEW wear simulation

4.2 MEEW磨耗仿真工况设计

影响MEEW磨耗结果的因素很多，本文研究铰链数量、车速、车轮运动方向对MEEW磨耗的影响。由车轮负荷特性结果可知，铰链数量影响MEEW接地印迹的尺寸，而接地印迹的大小直接影响磨耗区域的大小。由表4所示MEEW接地印迹数据可知，铰链数量会改变接地印迹尺寸，进而影响磨耗区域。图10所示为车速50 km/h、18组铰链的MEEW胎体温度分布，横坐标为以某处为零点的车轮接触面展开角度，纵坐标为以中心线为零点的宽度。磨耗发生在轮胎与地面的接地区域，所以将不同条件下的接地区域(240°～270°)温度场以预定义场的形式加载至仿真模型。由图10可看出，240°～270°的MEEW温度变化较小。为方便计算，将接地区域的中心温度作为接地区域温度。各工况对应的温度如表6所示。

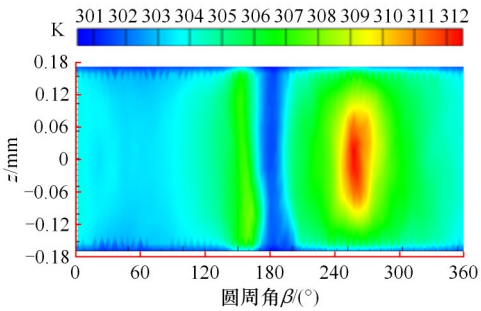


图10 车速50 km/h、18组铰链MEEW胎体稳态温度分布

Fig.10 Steady-state temperature distribution of MEEW tire carcass with 18 sets of hinges at a vehicle speed of 50 km/h

车辆在左转、直行、右转时的车轮磨耗深度和接触压力分布存在差异，针对上述工况开展分析。磨耗仿真的行驶距离为1000 km，工况分为三类，其中，工况Ⅰ为车速50 km/h，直行，6组、12组、18组铰链；工况Ⅱ为车速30 km/h、50 km/h、70 km/h，直行，18组铰链；工况Ⅲ为车速30 km/h，18组铰链，车辆运动方向分别为左转20°、直行、右转20°，侧倾角为1°。

表6 不同工况下的接地区域温度

Tab.6 Temperature of contact area under different conditions ℃

车速/(km·h^{-1})	铰链数量/组		
	6	12	18
30	33	30	29
50	35	33	31
70	40	37	35

为比较温度对MEEW磨耗结果的影响，从每类工况中各选取一组算例，分别开展考虑温度场与不考虑温度场的仿真。

滑移率也是决定轮胎磨损特性的重要因素。为明确磨耗量与滑移率的关系，设置工况Ⅳ即车速30 km/h，直行，18组铰链，研究滑移率1.67%、3%、5%的磨耗。

5 仿真结果分析与讨论

5.1 接触压力

图11为MEEW接触区域的接触压力分布图。本文研究范围内的车速变化对MEEW接地压力分布的影响很小，因此不对车速进行单独分析。铰链数量分别为6组、12组和18组时，MEEW与地面接触区域的接触压力分布高度一致：接触压力集中在轮胎中部，压力分布近似椭圆形，压力由中心向边缘递减；三种铰链数量的接触压力大小不同，但压力分布的位置和形态未发生本质变化。

图12展示了左转、直行和右转工况下的MEEW接触压力分布。直行时，接触压力呈现以轮胎中部为中心的椭圆形，与稳态工况Ⅰ所表现的接触压力分布特性类似。转向时，接触压力分布不对称，接触压力的中心向转向一侧偏移；转向侧的接触压力峰值更大，另一侧的接触压力较低但分布集中。非对称的压力分布在连续转向后使MEEW出现不均匀磨耗，缩短轮胎的磨耗寿命。

5.2 磨耗深度

不同工况下MEEW磨耗深度如图13所示。如图13a所示，不同数量铰链的MEEW磨耗深度分布与接地压力分布相似，即由胎肩向胎中线逐渐增大；铰链从6组增加到18组时，MEEW磨耗

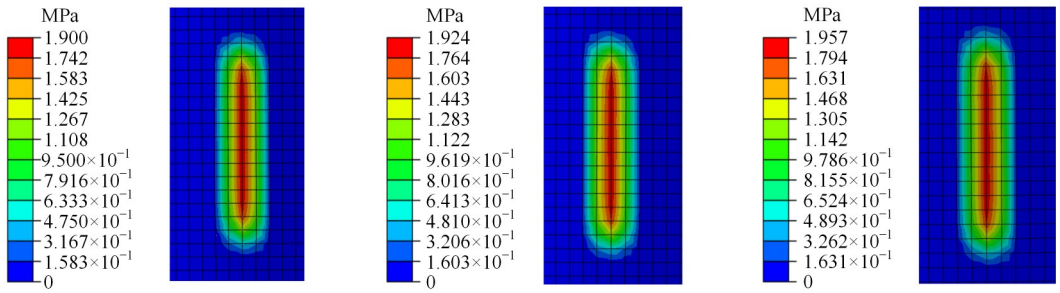


图 11　工况Ⅰ下不同铰链数量的 MEEW 接地压力分布

Fig.11　Contact pressure distribution of MEEW with different numbers of hinges under Condition Ⅰ

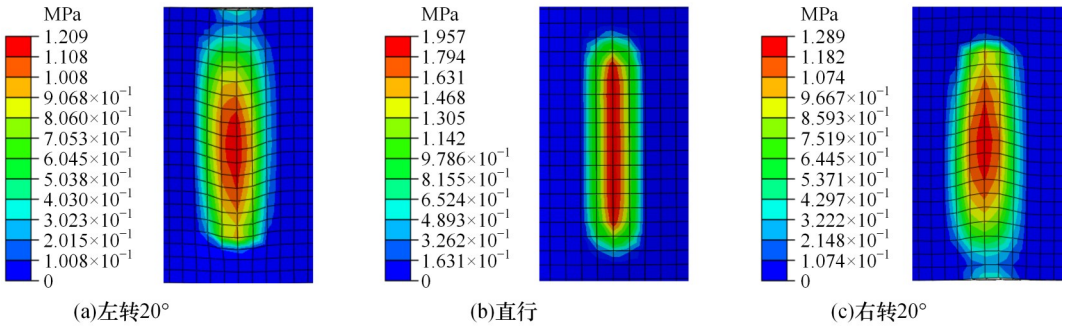


图 12　工况Ⅲ下不同行驶方向的 MEEW 接地压力分布

Fig.12　Contact pressure distribution of MEEW under different driving directions in Condition Ⅲ

区域的深度递减，峰值由 0.149 mm 降至 0.125 mm；考虑温度影响的磨耗显著大于未考虑温度影响的磨耗。在磨耗较深区域，未考虑温度的磨耗深度约为考虑温度的 55.6%，这是因为考虑温度影响时，摩擦生热导致接触区域材料软化，影响接触区域的接触状态，导致磨耗量变大。不考虑温度时，磨耗深度变化平缓。温度对磨耗的影响上，工况Ⅱ和工况Ⅲ的情况与工况Ⅰ类似，下文不再赘述。

由图 13b 可看出，不同车速使磨耗深度存在差别，但磨耗深度分布趋势一致。随着车速从 30 km/h 增加到 70 km/h，接触区域温度上升，温度的升高使磨耗深度递增。行驶车速通过“速度-温度-磨耗”的机制间接影响 MEEW 的磨耗，温度

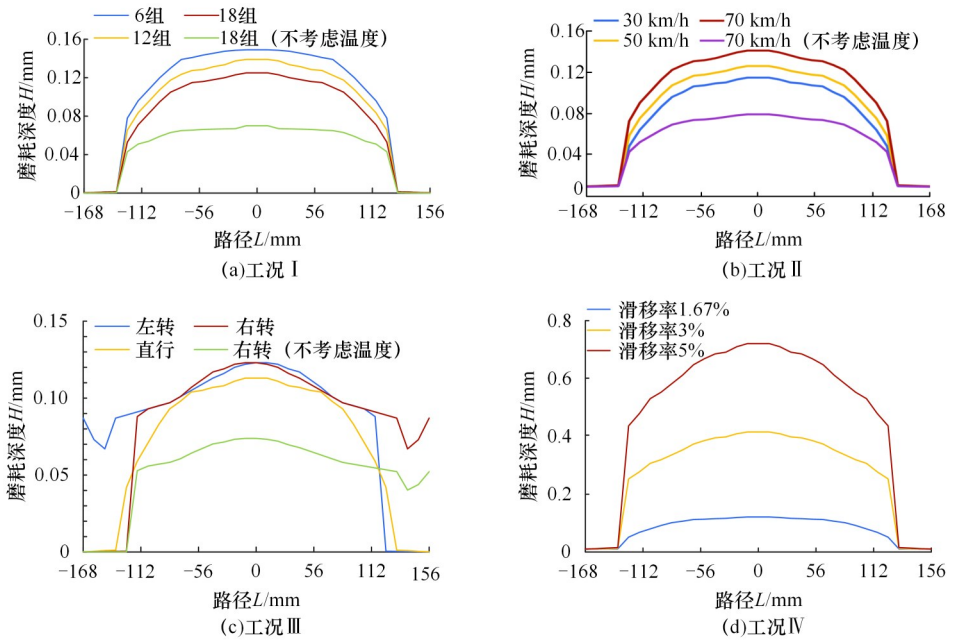


图 13　不同工况下 MEEW 磨耗量

Fig.13　Wear amount of MEEW under different working conditions

是关键的中间变量。

图13c表明，不同行驶方向的磨耗深度存在显著差异。直行时，磨耗深度自胎肩向胎面中部逐渐增大，胎面宽向的大部分区域磨耗深度保持在较高水平。转向时，转向侧的磨耗深度大于直行的磨耗深度，说明转向使磨耗作用范围扩大。磨耗区域更加分散。三种行驶方向的磨耗均在几何中心区域出现明显峰值，但转向行驶的磨耗深度峰值稍小。左转与右转的磨耗深度分布近似对称，这一规律与轮地接触压力的分布特点一致。

由图13d可看出，不同滑移率的磨耗深度分布出现差别。滑移率越大，磨耗深度的峰值与分布范围越大。这是因为增大滑移率会加剧车轮与接触界面的摩擦，改变接触应力分布，强化磨耗效应，因此滑移率是调控车轮磨耗特性的重要参数。

6 结论

1)在负载30 N、60 N、90 N，砂纸粒度80目、180目、240目，温度25 ℃、60 ℃、100 ℃、120 ℃，滑移速度0.3 m/s、0.8 m/s、1.0 m/s、2.0 m/s下开展了MEEW胎面橡胶摩擦试验，依照试验结果拟合了考虑温度的橡胶摩擦因数模型。

2)MEEW胎面橡胶磨耗的实测数据与仿真数据的最大相对误差为2.5%，表明磨耗仿真方法对MEEW磨耗分析具备有效性。

3)分析了铰链数量、车速、行驶方向对磨耗深度与接地压力的影响。铰链由6组增至18组时，MEEW的磨耗深度峰值减小16%；车速从30 km/h提高至70 km/h时，磨耗深度整体增大。转向工况相比直行工况的磨耗深度变化存在显著差异。未考虑温度的磨耗深度约为考虑温度的55.6%。随着滑移率的增大，MEEW的磨耗深度快速增大。

本文研究不涉及瞬态温度场分析、车轮花纹对磨耗的影响。后续将重点探究制动等瞬态工况，同时结合车轮花纹开展磨耗仿真研究，以通过优化设计延长MEEW结构的使用寿命，并提升其性能。

参考文献：

[1] SAKHNEVYCH A, GENOVESE A. Tyre Wear Model: a Fusion of Rubber Viscoelasticity, Road Roughness, and Thermodynamic State [J]. Wear, 2024, 542/543: 205291.

[2] 汤洁，张丽慧，周春宇，等. 橡胶减摩抗磨改性研究进展[J]. 摩擦学学报(中英文)，2024，44(3)：379-395.
TANG Jie, ZHANG Lihui, ZHOU Chunyu, et al. Research Progress on Antifriction and Anti-wear Modification of Rubber[J]. Tribology, 2024, 44(3): 379-395.

[3] NAKAJIMA Y. Advanced Tire Mechanics[M]. Singapore: Nature, 2019.

[4] 王锐佳，雍占福，杨永宝. 轮胎磨损与轮胎动力学性能变化的研究进展[J]. 橡胶工业，2021，68(2)：140-145.
WANG Ruijia, YONG Zhanfu, YANG Yongbao. Research Progress of Tire Wear and Tire Dynamic Performance Change[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(2): 140-145.

[5] CHO J R, CHOI J H, KIM Y S. Abrasive Wear Amount Estimate for 3D Patterned Tire Utilizing Frictional Dynamic Rolling Analysis[J]. Tribology International, 2011, 44(7/8): 850-858.

[6] 张竞楠. 轮胎胎面磨耗仿真分析及磨耗特性的研究[D]. 青岛：山东科技大学，2019.
ZHANG Jingnan. Simulation analysis of tire tread wear and study on its wear characteristic[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019.

[7] WANG Chen, HUANG Haibo, CHEN Xing, et al. The Influence of the Contact Features on the Tyre Wear in Steady-state Conditions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2017, 231(10): 1326-1339.

[8] NGUYEN V H, ZHENG D, SCHMERWITZ F, et al. An Advanced Abrasion Model for Tire Wear[J]. Wear, 2018, 396/397: 75-85.

[9] LI Runfeng, SUN Yiwen, YU Yunchang, et al. Finite Element Analysis for Tread Wear of Radial Tire[C]//2022 5th International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation (ICMRA), Wuha 2022: 101-106.

[10] LY A, Yoon C, Caruana J, et al. Development of an Advanced Wear Simulation Model for a Racing Slick Tire under Dynamic Acceleration Loading[J]. Machines, 2025, 13(8): 635.

[11] 周海超，王荣乾，梁晨，等. 考虑温度影响的橡胶摩擦磨损仿真方法研究[J]. 机械工程学报，2025，61(1)：253-264.
ZHOU Haichao, WANG Rongqian, LIANG Chen, et al. Research on Simulation Method of Rubber Friction and Wear Considering Temperature Effect[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(1): 253-264.

[12] 许顺凯，臧孟炎，周涛. 基于几何更新方法的轮胎胎面磨耗行为分析[J]. 机械设计与制造工程，2018，47(3)：86-90.
XU Shunkai, ZANG Mengyan, ZHOU Tao. Analysis of Tire Tread Wear Behavior Based on Updated Geometry Method[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2018, 47(3): 86-90.

[13] TENG Fei, WU Jian, SU Benlong, et al. A Cross-scale Analysis of the High Sliding Friction Mechanism of the Tread Rubber under Severe Working Conditions [J]. Wear, 2025, 578/579: 206144.

[14] LI Zhao, LI Ziran, WANG Yang. An Integrated Approach for Friction and Wear Simulation of Tire Tread Rubber. Part I: Friction Test, Characterization, and Modeling[J]. Tire Science and Technology, 2020, 48(2): 123-145.

[15] LI Zhao, LI Ziran, WANG Yang. An Integrated Approach for Friction and Wear Simulation of Tire Tread Rubber. Part II: Wear Test, Characterization, and Modeling[J]. Tire Science and Technology, 2020, 48(2): 146-165.

[16] BEDI V K, RANA K, MAHATA P, et al. A Predictive Approach to Estimate Tyre Wear Characteristics[J]. SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility, 2024, 6(6): 2739-2747.

[17] ZHAO Youqun, DU Xianbin, LIN Fen, et al. Static Stiffness Characteristics of a New Non-pneumatic Tire with Different Hinge Structure and Distribution[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(7): 3057-3064.

（下转第2753页）